

- программный комплекс реализован на языке программирования Object Pascal в среде Delphi 10 Lite, передача результатов расчета осуществляется в режиме реального времени с использованием COM-технологии в таблицы Excel (пакет программ Microsoft Office 97-2003).

Перечисленные свойства математической модели и программного обеспечения позволяют проводить анализ надежности СЭУ различных составов и конструкций при ремонтах и/или модернизациях. По результатам анализа может быть выбран рациональный, экономически обоснованный вариант управления рисками.

#### **Литература:**

1. Медведев В.В., Семионичев Д.С. Методические рекомендации по прогнозу и оценке рисков при обосновании целесообразности модернизации судовых энергетических установок // Научно-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. СПб.: РС. 2009. № 32. С.171–181.

2. Семионичев Д.С. Практические аспекты применения первого этапа формализованной оценки безопасности в судостроении. Методы анализа опасности и риска // Тр. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2009. №49 (333). С.149–158.

3. Семионичев Д.С., Медведев В.В. Программное обеспечение для обоснования целесообразности модернизации судовой энергетической установки на основе прогноза и оценки риска // Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов: Тр. Девятой сес. межд. научн. шк. СПб: ИПМаш РАН, СПбГУ ИТМО. 2009. С.51–53.

4. Семионичев Д. С. Особенности проектирования и модернизации судовой энергетической установки судна с использованием модели дерева отказов // Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление: мат. межд. научн. конф. СПб: СПГУВК. 2009. С.365–367.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА И РИСКА ОТКАЗА СЭУ И ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ**

**Семионичев Д.С.** (ФГУ «Российский морской регистр судоходства»);

**Медведев В.В.** (СПбГМТУ)

При определении остаточного ресурса и риска отказа СЭУ и ее элементов актуальной является проблема проверки адекватности разработанной математической модели и программного комплекса [1]. Решение этой проблемы связано, в частности, с подготовкой исходных данных [2]. Ниже описаны и проанализированы результаты экспериментальных исследований, которые позволяют судить о достоверности результатов расчетной оценки остаточного ресурса СЭУ и вероятности выхода из строя ее компонентов в течение исследуемого периода времени.

В ходе экспериментов проведена дефектация цилиндрических втулок главных двигателей 6ЧН 25/34 судна проекта 450М и цилиндрических втулок вспомогательных двигателей 8ЧН 25/34 рефрижераторного судна проекта 13476.

После двухгодичной навигации произведена повторная дефектация втулок цилиндров и по результатам измерений выполнена оценка надежности двигателей по критерию превышения предельно допустимого износа втулок цилиндра в течение следующих 20000 часов эксплуатации для главных двигателей и 5000, 10000, 15000 часов эксплуатации для вспомогательных двигателей. Также был определен средний ресурс двигателей по критерию износа цилиндрических втулок.

По результатам имитационного моделирования получено, что средняя наработка двигателя по критерию выхода из строя втулок вследствие износа с доверитель-

ной вероятностью 0,95 для ГД составляет  $41,1 \pm 4,7$  и  $40,8 \pm 3,2$  тыс. часов для двигателей соответственно правого и левого бортов. При рассчитанной скорости износа (при допущении о постоянной средней скорости износа в процессе эксплуатации двигателя) полный ресурс составляет 41,6 тыс. часов для главного двигателя правого борта (по предельному износу втулок второго и третьего цилиндров) и 38,5 тыс. часов для двигателя левого борта (по предельному износу втулок третьего и шестого цилиндров).

Для исследованных дизель-генераторов полные ресурсы составляют 33,8 (по предельному износу втулки восьмого цилиндра), 34,4 (по предельному износу втулок второго, шестого и восьмого цилиндра), 34,3 (по предельному износу втулки второго цилиндра), тыс. часов.

Эти результаты хорошо согласуются с расчетной средней наработкой, полученной с использованием математического моделирования. Кроме этого, указанные результаты соответствуют статистическим данным об отказах втулок цилиндров судовых двигателей типа ЧН 25/34, эксплуатируемых на судах Дальневосточного бассейна (наработка на отказ составила 39,9 тыс. часов).

В таблице 1 в качестве примера приведены результаты расчета вероятности возникновения отказов втулок цилиндров главных двигателей 6ЧН 25/34.

Таблица 1. Вероятность превышения допустимого износа втулок двигателей 6ЧН 25/34 в течение 20000 часов предстоящей эксплуатации по результатам имитационного моделирования

Цилиндр	1	2	3	4	5	6	Двигатель
Двигатель правого борта							
Вероятность отказа, %	0,05	3,22	1,59	3,03	4,28	0,91	12,79
Двигатель левого борта							
Вероятность отказа, %	0,03	0,15	1,65	0,72	0,78	2,48	5,66

С использованием разработанной методики и программного комплекса была произведена оценка надежности СЭУ судна проекта 1077U, предназначенного для перевозки генерального груза.

С этой целью дважды в ходе исследования была произведена дефектация импульсивной установки, содержащей главные двигатели марки 8Z280-ET (8ЧН28/36) мощностью 1765 кВт, изготовленные в 1990 году компанией Amagasaki Yanmar Diesel Engine Corporation.

Измерениям подлежали:

- износы шатунных и головных подшипников;
- зазоры в головном соединении, шатунных и рамовых подшипниках;
- зазоры между поршнем и цилиндрической втулкой;
- зазоры между поршневыми кольцами и канавкой (по высоте);
- зазоры между стержнями клапанов и направляющими;
- зазоры в подшипниках коромысла газораспределительного механизма;
- геометрические параметры цилиндрических втулок;
- раскаты коленчатого вала.

Были также проведены измерения зазоров в дейдвудном устройстве, произведена дефектоскопия лопастей гребного винта.

По результатам измерений выполнен расчет вероятности возникновения отказов на период 4000 часов. При математическом моделировании число итераций задавалось равным 100000.

В связи с тем, что вероятность возникновения отказа не превысила предварительно заданной предельной вероятности 2,5% для единичного отказа и 0,00001% для наступления одновременного (в промежутке менее 100 часов) отказа пропульсивных установок правого и левого бортов, энергетическая установка была допущена к эксплуатации в течение 4000 часов без проведения дополнительного ремонта. Отказов элементов СЭУ в течение указанного периода не наступило.

Была произведена оценка безопасной работы главного двигателя правого борта типа ЧН40/46 исследовательского судна проекта 12883. С учетом данных дефектации была проведена расчетная оценка вероятности возникновения отказов на период 5000 и 8000 часов предстоящей эксплуатации. Результаты расчетов приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. Вероятность возникновения отказа главного двигателя типа 6ЧН40/46 судна проекта 12883 в течение 5000 часов

Параметр	Вероятность наступления отказа, %					
	Цилиндр					
	1	2	3	4	5	6
Поршень	0,0170	0,0117	0,0140	0,0100	0,0094	0,0059
Головной подшипник	0,0041	0,0017	0,0032	0,0012	0,0043	0,0058
Втулка цилиндров	0,1211	0,1090	0,0650	0,1322	0,1260	0,1719
Крышка цилиндров	0,0111	0,0132	0,0168	0,0021	0,0015	0,0048
Впускные клапаны	0,0052	0,0040	0,0011	0,0004	0,0032	0,0080
Выпускные клапаны	0,0413	0,0117	0,0211	0,0241	0,0167	0,0308
Распределительный вал	0,0119					
Коленчатый вал	0,0341					
Общая вероятность отказа	1,0766					

Таблица 3. Вероятность возникновения отказа главного двигателя типа 6ЧН40/46 судна проекта 12883 в течение 8000 часов

Параметр	Вероятность наступления отказа, %					
	Цилиндр					
	1	2	3	4	5	6
Поршень	0,0410	0,0393	0,0501	0,0378	0,0320	0,0317
Головной подшипник	0,0101	0,0085	0,0077	0,0091	0,0113	0,0084
Втулка цилиндров	0,3014	0,1617	0,1217	11,2135	13,9140	8,7314
Крышка цилиндров	0,0219	0,0243	0,0318	0,0068	0,0018	0,0119
Впускные клапаны	0,0089	0,0056	0,0047	0,0045	0,0039	0,0102
Выпускные клапаны	0,0809	0,0312	0,0516	0,0380	0,0519	0,0490
Распределительный вал	0,0518					
Коленчатый вал	0,2056					
Общая вероятность отказа	32,1260					

По результатам расчетов были сделаны выводы о том, что уровень безопасности недостаточен для допуска дизеля к эксплуатации в течение 8000 часов без осуществления ремонта.

С помощью программного комплекса в рассматриваемом исследовании произведена оценка затрат/выгод при различных вариантах управления рисками и по предложенной методике принятия технических решений были даны рекомендации о выполнении ремонта через 5000 часов эксплуатации. В качестве наиболее вероятных объектов, требующих замены, определены втулки 4, 5 и 6 цилиндра. С учетом остаточного ресурса втулок, равного около 5000 часов, было рекомендовано продолжить эксплуатацию двигателя в течение этого периода с последующей оценкой его технического состояния.

Для проверки точности сделанного прогноза и оценки правильности сделанных выводов двигатель был допущен к эксплуатации, а после 4850 часов разобран и повторно дефектован. По результатам измерений были заменены втулки 4 и 6 цилиндра (в них обнаружено превышение допустимой овальности) и втулка 5 цилиндра (обнаружено превышение допустимого износа). Неисправности других элементов не прогнозировались расчетами и не были выявлены фактически.

На основании сопоставления результатов расчетов с экспериментальными данными можно сделать следующие выводы:

- разработанные математическая модель и соответствующий программный комплекс позволяют оценить с достаточно высокой достоверностью остаточный ресурс элементов СЭУ;

- с использованием математического моделирования удается количественно оценить надежность работы каждого основного элемента СЭУ в течение исследуемого периода времени;

- наличие результатов предыдущей дефектации элементов СЭУ позволяет значительно повысить точность вычислений за счет учета условий эксплуатации и фактической скорости изнашивания деталей;

- результаты расчета позволяют проанализировать надежность оборудования и сравнить полученный показатель риска возникновения отказа со значением приемлемого риска, соответствующего рекомендациям ФОБ;

- количественный результат расчета обеспечивает возможность выбора технически обоснованного и экономически эффективного варианта управления рисками.

#### **Литература:**

5. Семионичев Д.С., Медведев В.В. Результаты разработки математической модели и программного комплекса для расчета остаточного ресурса и риска отказа СЭУ и ее элементов // Двигатель – 2010: Тр. Научно-техн. конф. М.: Изд-во МГТУ. 2010.

6. Медведев В.В., Серов А.В., Семионичев Д.С. Применение процедуры ФОБ к оценке риска эксплуатации судового дизеля и практика подготовки исходных данных // Тр. межотр. научно-техн. конф., посвящ. 100-летию П.А.Истомина. СПб: Изд-во СПбГМТУ. 2008. С.31–34.

## **ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ДИЗЕЛЕЙ ЯМЗ НА ТРАКТОРАХ КЛАССА ТЯГИ 10 ТОНН**

**Шароглазов Б. А., Сафаров М. Ф.** (Южно-Уральский государственный университет)